

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180842

## 基于改进 Hausdorff 距离算法的发变组大差保护新原理

王峰<sup>1</sup>, 黄明辉<sup>1</sup>, 李一泉<sup>1</sup>, 吴梓亮<sup>1</sup>, 曾耿晖<sup>1</sup>, 陈桥平<sup>1</sup>, 赵青春<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东电网有限责任公司 RTDS 继电保护仿真重点实验室, 广东 广州 510600; 2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 发变组大差动保护属于保护双重化中主保护的一种, 传统发变组大差保护动作速度慢且易受电流互感器饱和和影响。对此, 提出了一种兼备速动性及抗饱和特性的基于改进 Hausdorff 距离算法的发变组大差保护新判据。首先分析了改进 Hausdorff 距离算法的基本原理: 在发变组区内故障时, 由各端电流构造的 Hausdorff 距离值较大; 在区外故障及正常运行时, 由各端电流构造的 Hausdorff 距离值较小, 基本为 0。基于此原理提出了发变组大差保护新判据, 并给出了阈值整定方案。另外, 提出了电流互感器饱和识别及保护再开放策略。理论分析和仿真结果验证了所提保护方案的有效性, 能快速可靠识别区内故障, 在区外故障饱和和情况下可靠闭锁, 再次发生转换性故障时也能快速开放, 且判据阈值整定简单, 不受系统参数的影响。

**关键词:** 发变组; 大差保护; 改进 Hausdorff 距离; 速动性; 互感器饱和

### New principle of generator-transformer large differential protection based on improved Hausdorff distance

WANG Feng<sup>1</sup>, HUANG Minghui<sup>1</sup>, LI Yiquan<sup>1</sup>, WU Ziliang<sup>1</sup>, ZENG Genghui<sup>1</sup>, CHEN Qiaoping<sup>1</sup>, ZHAO Qingchun<sup>2</sup>

(1. Controlling and Dispatching Center of Guangdong Power Grid, Key Laboratory for Protective Relaying Real Time Digital Simulation of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China; 2. NR Engineering Co., Ltd, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The large differential protection of generator-transformer unit is one of the dual main protections. The traditional large differential protection of generator-transformer unit is easy to be influenced by current transformer saturation and the operation is slow. To dealing with above problems, a new criterion for large difference protection of generator-transformer unit based on improved Hausdorff Distance algorithm is proposed, which has high operation speed and anti-saturation capability. Firstly, the basic principle of the Hausdorff Distance algorithm is analyzed: when the fault occurs within the generator-transformer unit, the Hausdorff Distance constructed by the current of each terminal is big; when the fault is outside the generator-transformer unit or the system is under normal operation, the Hausdorff Distance constructed by the current of each terminal is smaller, which is basically 0. Based on this principle, a new criterion for the large difference protection of generator-transformer unit is proposed, and the threshold setting scheme is proposed. In addition, the current transformer saturation recognition strategy and protection opening strategy are proposed. Theoretical analysis and simulation results verify the effectiveness of the proposed protection scheme, which can quickly identify the internal fault and be reliably locked under external fault with current transformer saturation, can quickly open again under converted fault. The threshold value setting process is simple and not affected by system parameters.

This work is supported by Science & Technology Program of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJQQ20161176) and National Natural Science Foundation of China (No. 51677108).

**Key words:** generator-transformer; large differential protection; improved Hausdorff Distance; speed; current transformer saturation

## 0 引言

随着电网容量的扩大和耦合程度的不断加深,

电力系统短路电流水平迅速增加, 继电保护算法对于速动性和抗饱和的需求也愈发强烈。如果保护算法能迅速识别故障, 则能在事故发展恶化前将其隔离, 从而降低故障可能造成的严重后果; 若在某些场景下互感器进入饱和状态, 或者是饱和之后再发生区内故障, 则需要保护算法能够具有良好的抗饱

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目资助 (GDKJQQ 20161176); 国家自然科学基金面上项目资助 (51677108)

和能力。

现阶段提升保护速动性的研究主要集中在高频暂态分量方面,如以电流波形梯度和故障暂态法<sup>[1-2]</sup>为代表的时域分析法,以小波分析为代表的时频分析法<sup>[3-5]</sup>,均可以实现故障的快速识别。然而因其对高频采样信号的依赖,投入实际工程应用尚有一段距离<sup>[6]</sup>。在基于工频信号的保护原理方面,采样值差动原理也在不断被完善以适应速动性的需求<sup>[7-11]</sup>,但是采样值差动的时间窗受动作模糊区的制约,动作速度难以进一步提升。在应对电流互感器暂态饱和问题上,传统方法大多是在识别饱和后闭锁保护,经过一段时延后再开放<sup>[12-13]</sup>,该方法无法应对闭锁时延内发生的区内故障。文献[14]提出一种基于动态时间弯曲的新型容差式差动保护算法,该算法对于互感器饱和和有较好的抗性,能实现保护在饱和时不闭锁,但由于动态时间弯曲距离算法需要求取高阶量、计算量大,限制了该算法的广泛应用。

基于 Hausdorff 距离的波形相似度比较算法因其时间窗短、计算量小,能针对性地识别波形特征,对于局部形变失真、噪声、部分缺失等常见信号干扰的优良抗性在医学病理诊断方面得到了广泛的应用<sup>[15-16]</sup>。目前已有学者将其引入电力系统故障识别中,文献[17]提出一种基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据,文献[18]提出一种基于波形相似度比较的线路快速纵联保护算法。上述方法动作速度快,且具有一定的抗数据干扰能力,但上述方法在区外故障电流互感器饱和情况下存在误动的风险。

为此,针对传统发变组大差保护动作速度慢及易受电流互感器饱和影响的问题,本文引入 Hausdorff 距离算法实现发变组区内故障的超快速切除,并提出保护判据门限值整定方法及应对电流互感器饱和的动作逻辑方案。理论分析和仿真结果验证了所提保护方案的有效性。

## 1 Hausdorff 距离基本原理及其改进

### 1.1 Hausdorff 距离基本原理

下面以两端系统为例说明 Hausdorff 距离基本原理,对于多端系统(假设为  $N$  端),只需将  $N-1$  端电流相量相加合成一端,即可构成“两端”系统。假设  $A$ 、 $B$  为两组点集,分别为

$$A = \{a_1, \dots, a_p\} \quad (1)$$

$$B = \{b_1, \dots, b_q\} \quad (2)$$

则这两个点集之间的 Hausdorff 距离  $H(A, B)$  定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (3)$$

$$h^f(A, B) = \max_{a \in A} f^{th} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (4)$$

$$h^f(B, A) = \max_{b \in B} f^{th} \min_{a \in A} \|a - b\| \quad (5)$$

式中:  $f$  为前向分数且满足  $f \in (0, 1]$ ;  $\| \cdot \|$  表示两点之间的欧式距离。式(2)中对点集  $A$  中单点(如  $a_i$ )与集合  $B$  中所有点进行距离比较,找到对于  $a_i$  最近的点  $b_j$ , 使  $b_j$  满足:

$$\|a_i - b_j\| \leq \|a_i - b_k\| (1 \leq k \leq q \text{ 且 } k \neq j) \quad (6)$$

则  $\|a_i - b_j\|$  为对应  $a_i$  点的最小距离,

$\max_{a \in A} f^{th} \min_{b \in B} \|a - b\|$  表示从点集  $A$  中所有点到点集  $B$  的  $p$ (点集  $A$  中元素数量)个最小距离从小到大排列,所占比例为  $f$  的距离值。当  $f=1$  时,  $h(A, B)$  即为所有最小距离的最大值,称为从点集  $A$  到点集  $B$  的单向 Hausdorff 距离,当  $f \in (0, 1)$  时,称为从点集  $A$  到点集  $B$  的部分单向 Hausdorff 距离。点集  $A$  到点集  $B$  与点集  $B$  到点集  $A$  单向距离间较大值称为 Hausdorff 距离。

### 1.2 Hausdorff 距离的通道特性

若规定两组波形的 Hausdorff 距离不大于某定值即判为相似,则波形相似在形态上具有通道特性。如图 1 所示(图中 Hausdorff 距离算法数据窗长为整周波),以波形 A 作为基准,用实线表示,获得与 A 的 Hausdorff 距离恒为  $H_{set}$  的虚线 B 与 C, B 和 C 围绕 A 形成一个闭合的二维通道,当式(4)中的  $f \in (0, 1)$  时,比例为  $\frac{f}{1-f}$  的点在通道之内则判定两波形相似。一旦波形出现形态上的差异,几乎所有的点落在  $H_{set}$  所对应的通道之外,波形形态的背离将造成 Hausdorff 距离迅速增加。

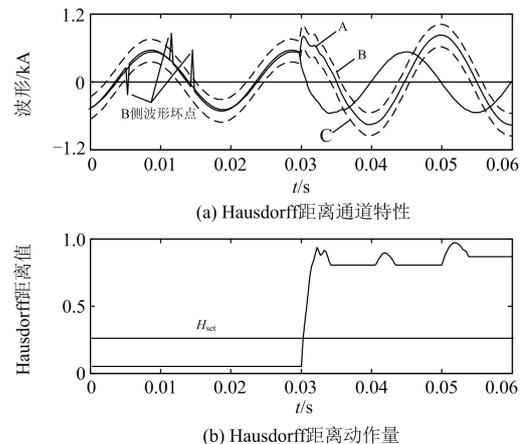


图 1  $f=0.9$  时 Hausdorff 距离的动作量示意图

Fig. 1 Operating quantity of Hausdorff Distance when  $f=0.9$

Hausdorff 距离算法的通道特性使相似比较具有裕度,同时,该算法允许少数点在通道之外的特性使其免受离群坏点的影响,上述特性使该算法在一定程度上可以克服噪声带来的干扰。此外,通道内波形的断续对算法相似度比较的结果影响较小,使其具备抗数据丢失的能力。

### 1.3 适用于电流波形特点的改进 Hausdorff 距离算法

将 Hausdorff 距离算法应用于电流波形的相似度比较需考虑以下三个因素。

1) 离群点舍弃: Hausdorff 距离度量的是两个点集间的最大不相似程度,因此,单个离群点会对波形相似判断结果产生较大的影响。

2) 计算速度优化: 针对电流波形本身具备的相似性、周期性和连续性选取合适数据窗长,保证算法识别能力的同时优化算法的计算速度。

3) 相似比例: 原有 Hausdorff 距离算法只能进行整体的最大不相似程度判断,但是对于电流波形,可能存在部分区段相似,部分区段不相似的情况,整周波内相似比例的识别对于各种状况的鉴别是一个重要的指标。

针对上述因素,可采取以下措施。

1) 采用  $f < 1$  的 Hausdorff 距离,消除少量离群坏点对相似度判断结果的影响。

2) 针对电流互感器正常状态和电流互感器饱和状态的特点,对式(4)中点集取不同数据窗长,正常状态选取短于周波的数据窗长,提升运算速度,饱和状态选取整周波数据窗长,利用更多信息提升算法可靠性。

3) 原有 Hausdorff 距离算法只是对点集中所有距离最小值整体的反映,通过在算法输入端增加门限定值,并与点集  $A$  和  $B$  内每个距离最小值进行比较:

$$\min_{\substack{b \in B \\ a \in A}} \|a - b\| < H_{\text{set}} \quad (7)$$

最小距离小于门限值即为相似,大于门限值即为不相似,因而获取所有相似最小值的数量,进而计算两端波形的相似比例。

## 2 基于改进 Hausdorff 距离算法的发变组大差保护原理

### 2.1 保护动作判据

以图 2 所示的故障模型为例,对基于改进 Hausdorff 距离的发变组大差保护判据进行说明。

规定电流流向发变组的方向为正方向,两侧电流互感器采样值序列分别为  $I_1$  和  $I_2$ ,  $I_1$  和  $I_2$  为电流波形的采样点集:  $I_1 = \{(a_1, b_1), \dots, (a_n, b_n)\}$ ,  $I_2 =$

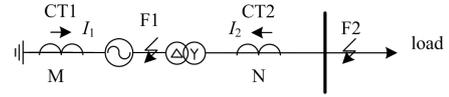


图 2 区内外故障模型

Fig. 2 Internal and external faults model

$\{(c_1, d_1), \dots, (c_m, d_m)\}$ , 使用波形相似度算法前,需要对  $I_1$  和  $I_2$  进行相应变换。首先,因为 CT1 的正方向与 CT2 正方向各自指向线路,电流  $I_1$  和  $I_2$  的波形呈反相特性,需将其中某侧采样点数据进行反相处理,  $-I_2 = \{(c_1, -d_1), \dots, (c_m, -d_m)\}$ , 其中  $-I_2$  表示 2 端电流采样值的负值。其次,将横轴的时间数据及纵轴的电流数据进行标幺化,统一单位,  $a_i^* = a_i / a_T$ ,  $a_T$  为时间基准值,取工频周波时间长度,  $b_i^* = b_i / b_N$ ,  $b_N$  为电流基准值,取该线路的额定电流。得到  $I_i^* = \{(a_1^*, b_1^*), \dots, (a_n^*, b_n^*)\}$  用于计算。

设计基于改进 Hausdorff 距离算法的新型发变组大差保护动作判据为

$$H(I_1^*, -I_2^*) \leq H_{\text{set}} \quad (8)$$

$H(I_1^*, -I_2^*)$  表示变换后两侧电流互感器采样电流波形的改进 Hausdorff 距离,定义该距离为动作量;  $H_{\text{set}}$  为门限整定值;在线路正常情况及区外故障情况下,波形形态接近一致,  $H(I_1^*, -I_2^*)$  很小。当发生区内故障时,  $I_1^*$  与  $-I_2^*$  波形形态差异巨大,此时改进 Hausdorff 距离值  $H(I_1^*, -I_2^*)$  大于门限值  $H_{\text{set}}$ , 保护动作。

### 2.2 保护动作门限值整定

正常状况及区外故障下,两侧电流相位相差近似为  $180^\circ$  (电流正方向如图 2 所示),区内故障下,电流相位差近似为  $0$  度。作为对保护范围内正常状态和故障状态的区分,取电流相位差  $90$  度的中间状态,在该场景下设置电流  $I_1$ 、 $I_2$  大小为线路额定电流幅值并利用 Hausdorff 距离算法进行计算,得到距离值  $H_{90^\circ}$ ,将该距离值乘以可靠系数,得到固定门限值:

$$H_{\text{set}} = H_{90^\circ} \cdot K_{\text{rel}} \quad (9)$$

该门限值表征相似的边界,作为保护整定值,用于动作量的判断和相似百分比的计算。

### 2.3 电流互感器饱和识别判据

考虑到保护的速动性,常规故障判断下,通过对最临近时间内短数据窗的相似判断,即可实现故障的出口,但是区外故障电流互感器饱和状态下,短窗窗内数据可能全为互感器饱和畸变区内的

数据, 而畸变传变区内的波形差别较大, 此时相似判断的结果无法保证对饱和的选择性。但是对于电流互感器, 无论饱和程度多深, 电流互感器在一段时间内仍有一段线性传变区, 线性传变区至少为周波的三分之一, 分别分布在正负半波<sup>[19]</sup>, 式(7)所计算的相似比例能反应线性传变区的部分相似特性, 有效识别区外故障造成的饱和, 并区分饱和的同时所发生的区内故障, 并出口保护。

改进 Hausdorff 距离算法的差动保护所输出的相似判断和相似比例两个量具备不同的特点, 相似判断具备速动性, 相似比例具备更强的选择性。为使这两个输出量同时发挥各自的优势, 需要一个反应电流大小的参量, 电流较小时算法侧重于速动性, 电流增大后侧重于选择性, 因而引入参量  $S$  为

$$S = \sum_{n=1}^N (i_n^{*2} + i_{2n}^{*2}) \quad (10)$$

式中:  $i_1^*$  和  $i_2^*$  为 1 侧和 2 侧实时测量的离散电流数据;  $S$  反映了数据窗内电流波形有效值。

电流互感器发生饱和后的一段时间内, 互感器仍为线性传变区, 其特点在于电流幅值急剧增大的同时两侧波形保持相似, 基于该特点, 设置饱和识别判据:

$$\begin{cases} S > S_{\text{set}} \\ H < H_{\text{set}} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $S > S_{\text{set}}$  表明电流量急剧增大, 大于门限整定值, 与此同时两侧波形相似, Hausdorff 距离动作量  $H$  小于门限值  $H_{\text{set}}$ 。满足该判据时, 启动保护的疑似饱和模式, 疑似饱和模式采用整周波数据窗进行计算, 利用更多电流采样值信息, 根据电流互感器饱和状态下两侧波形的相似比例实时判断区内故障, 从而消除互感器饱和状态下区内故障的识别盲区, 具体过程在 2.4 节进行说明。

## 2.4 电流互感器饱和和下保护开放策略

### 2.4.1 区内故障速动

区内故障发生后, 在通过线路的电流增大过程中, 改进 Hausdorff 距离算法迅速识别故障特征, 动作量迅速上升到达门限, 满足式(8), 保护动作。而故障发生到产生饱和的时间大于动作时间, 饱和现象出现时保护已跳开, 故区内故障饱和不会对基于改进 Hausdorff 距离算法的差动保护造成影响。

### 2.4.2 区外饱和闭锁

若流经线路电流增大, 而两侧波形间特征无明显差异, 同时动作量没有到达门限值, 则说明故障不是发生在区内, 满足式(11)。此时采用牺牲速动性来换取保护可靠性与选择性的策略, 保护由速动模式切换至疑似饱和模式。如图 3 所示, 该模式下将数据窗长切换为全周波, 并利用波形相似比例来锁定波形特征。若全周波之内, 波形有超过三分之二为相似, 说明互感器饱和而区内无故障, 保护闭锁。

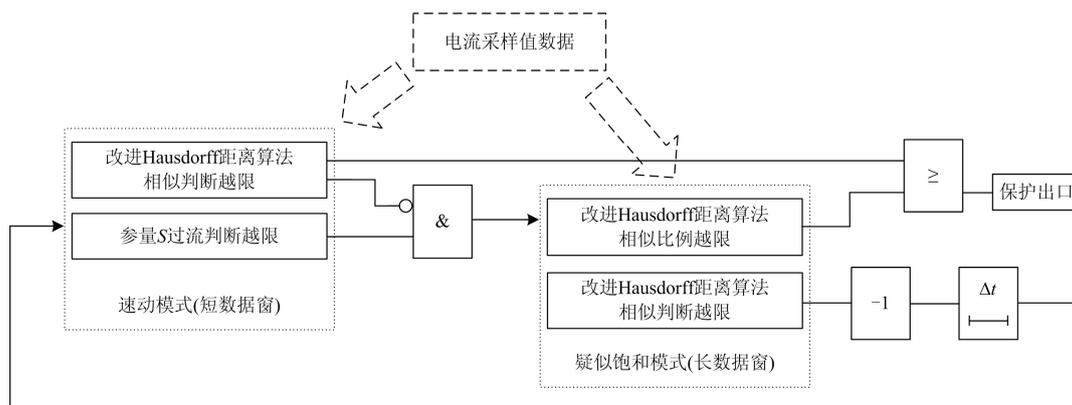


图 3 保护模式的切换机制及保护动作逻辑

Fig. 3 Switching mechanism of protection mode and protection action logic

### 2.4.3 疑似饱和模式下转区内故障动作

疑似饱和模式下发生区内故障时, 两侧电流波形的部分相似特性被破坏, 波形相似比例降低到整定值以下, 不再闭锁保护。则基于改进 Hausdorff 距离保护算法的差动保护可靠动作出口。

### 2.4.4 疑似饱和模式退出机制

导致区外饱和的故障被切除后, 流过线路的电

流恢复到负荷电流水平, 互感器退出饱和, 两侧电流波形恢复到相似的形态, 改进 Hausdorff 距离算法的相似判断动作量不再超过整定值, 以此为指标, 经过  $\Delta t$  延时之后退出疑似饱和模式, 恢复保护的速动性。

改进 Hausdorff 距离算法能应对各种包含饱和的工况: 在区内故障时能在互感器进入饱和之前快

速切除故障，不受饱和影响；在区外故障时，能转入疑似饱和模式实现可靠不动作；当区外饱和和转区内故障时，通过整周波长的时间窗识别故障；在饱和的异常状态解除之后，能根据判据配合延时退出疑似饱和模式，重新恢复为速动模式的差动保护。

### 3 基于改进 Hausdorff 距离算法的差动保护特性分析

常规的差动保护在速动性上具有一些局限。传统相量差动保护采用傅氏全波或者半波算法处理采样信号，因而理论上动作速度无法突破半个周波的限制。采样值差动对每一个采样值分别计算，时间窗长小于整个周波，提升了保护的動作速度。但是该方式也存在瓶颈：随着时间的变化，每个时刻对应的动作量和制动量均会产生波动，该特性造成采样值差动在保护的動作区和制动区之间有一段模糊区。

针对这种情况，采样值差动采用连续  $R$  次判别中  $S$  次满足时即动作，差动判据为

$$R - S \leq 2 \quad (12)$$

这种判据方式导致了采样频率较高而数据窗内采样点数较少时容易产生误动，如图 4 所示。

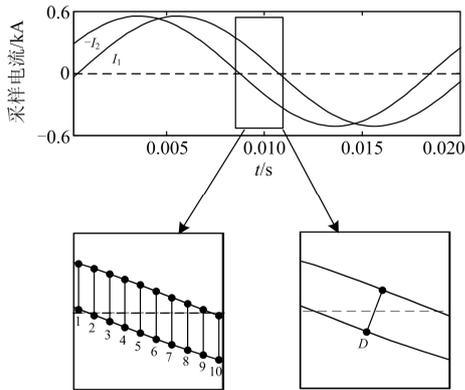


图 4 采样值差动及 Hausdorff 距离对比

Fig. 4 Comparison between sampled values differential protection and Hausdorff Distance

当数据窗较短时(图中为八分之一波长)，对于 4 kHz 采样率的情况，有 10 个采样点，除开采样点 1 和采样点 10 处同号外，其余 8 个采样点处  $I_1$  与  $I_2$  为异号，满足判据：

$$|I_1 + I_2| > K |I_1 - I_2| \quad (13)$$

同时也满足  $R - S = 2$ ，产生了误动，要保证区外故障采样值差动的制动特性优于或等于常规相量差动，对于和差制动和最大值制动方式， $S$  的选取应满足  $S > 0.25N$ ，采样值差动保护最快动作时间为故障后的  $S$  个采样点，该特点决定了采样值差动

最快的动作速度为四分之一周期，不能随着采样频率的提高而进一步提高动作速度。

Hausdorff 距离的计算考量两个波形之间的绝对背离程度，可利用任意时刻的数据窗(数据点同时包含故障前及故障后的暂态时刻)，因而该算法具有暂态优越性。作为波形比较算法，Hausdorff 距离值实时反映了两侧波形的不相似程度，数据窗每向后移动一个点，输出一个结果，故障采样点进入数据窗后，Hausdorff 距离值上升，在故障时刻后几个采样点内即可完成故障的识别，采样频率 4 kHz 时，1~2 ms 即可识别故障，该速度下识别并切除故障，能抑制电流的进一步增大。

如图 4 所示，Hausdorff 距离  $D$  从波形上表示一侧波形到另一侧波形最大的最小点距，该距离包含了经变换化后的电流及时间的差值信息，在与采样值差动相同的场景下，该 Hausdorff 距离小于前述整定门限值，保护不动作。通过对时间窗内数据更有效的利用，实现波形特征的快速识别，特征区别越明显识别速度越快，保护窗长不受四分之一波长的最低限制，进一步提升了保护的速动性。

### 4 仿真分析

参照文献[20]在 Matlab/Simulink 中搭建如图 2 所示的发变组大差动模型，具体参数如下：发电机出口电压为 13.8 kV，500 kV 两圈升压变压器采用 Yn/D-11 接线，CT1 和 CT2 采用 4 kHz 频率采样。保护判据采用八分之一周波的时间窗，动作门限值设置为 0.525。

#### 4.1 区内故障

##### 4.1.1 区内故障无饱和情况

$t = 0.03$  s 时 F1 点发生 A 相单相接地故障，两侧 CT 均未饱和，其两侧电流波形如图 5 所示。

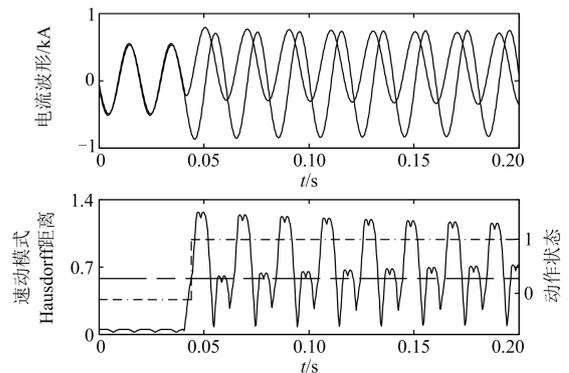


图 5 区内故障无饱和情况下电流波形图及动作量示意图

Fig. 5 Current waveform and action parameter under internal fault without saturation

故障发生后, 动作量立即发生跳变。2 ms 后达到粗虚线所示保护门限, 立即动作, 动作时刻线路两侧电流瞬时值分别为 $-0.14$  kA 和 $-0.64$  kA, 尚未达到短路电流峰值。

即便是小电流接地, 该算法也能迅速反应两侧波形的背离, 但是短窗内信息较少, 造成波形交叉点附近波动, 该波动只会出现在波形形态背离后的交点附近, 对反映形态差异的保护动作并无影响。

#### 4.1.2 区内故障互感器饱和情况

$t = 0.03$  s 时 F1 点发生两相接地短路故障, 考虑单侧 CT 饱和特性, 以 A 相为例进行分析, 其两侧电流及饱和电流如图 6 所示。

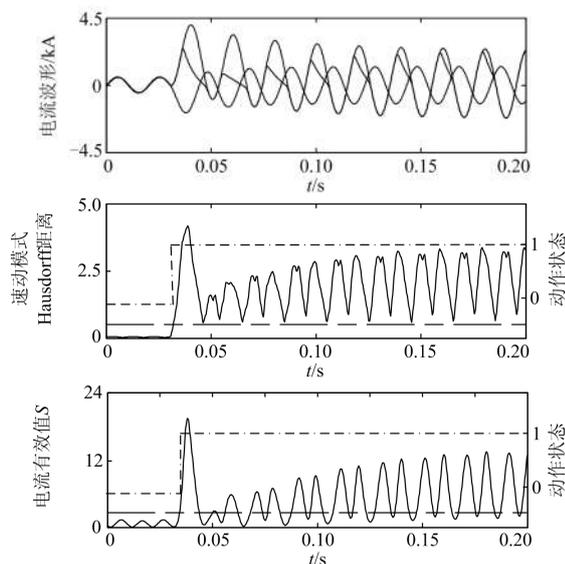


图 6 区内故障电流饱和和波形图及动作量示意图

Fig. 6 Current waveform and operating value under internal fault with saturation

Hausdorff 距离算法时间窗及动作量同区内故障无饱和情况, 故障后两侧电流急剧增大, 相对于 4.1.1 节中的小电流故障, 该情况下波形背离更为迅速, 故障后不到 2 ms 时动作量即越限动作。动作时刻  $S$  过流判断尚未越限, 基于 Hausdorff 距离先越限而过流判断后越限的特点, 保护直接出口而不会进入疑似饱和模式。

## 4.2 区外故障

### 4.2.1 区外故障导致互感器饱和情况

设置  $t = 0.03$  s 时区外 F2 点发生严重三相短路故障, 考虑单侧 CT 饱和特性, 以 A 相为例进行分析, 其两侧电流如图 7 所示, 其中给出了相似比例的动作量。

发生区外故障后, 流经线路的电流迅速上升,

导致  $S$  过流判断越限, 此时互感器仍在线性传变区, 两侧波形相似, 而动作量尚未明显增长, 从而满足疑似饱和判据, 启动采用整波数据窗的疑似饱和模式。疑似饱和模式下通过相似比例区别饱和及故障, 图 7 中不相似比例始终未达到三分之二的门限, 该情况下, 通过 Hausdorff 距离的计算结果判断疑似饱和模式的退出, 在 0.125 s 判别饱和解除, 经过一段时延后退出疑似饱和模式, 回到速动模式。

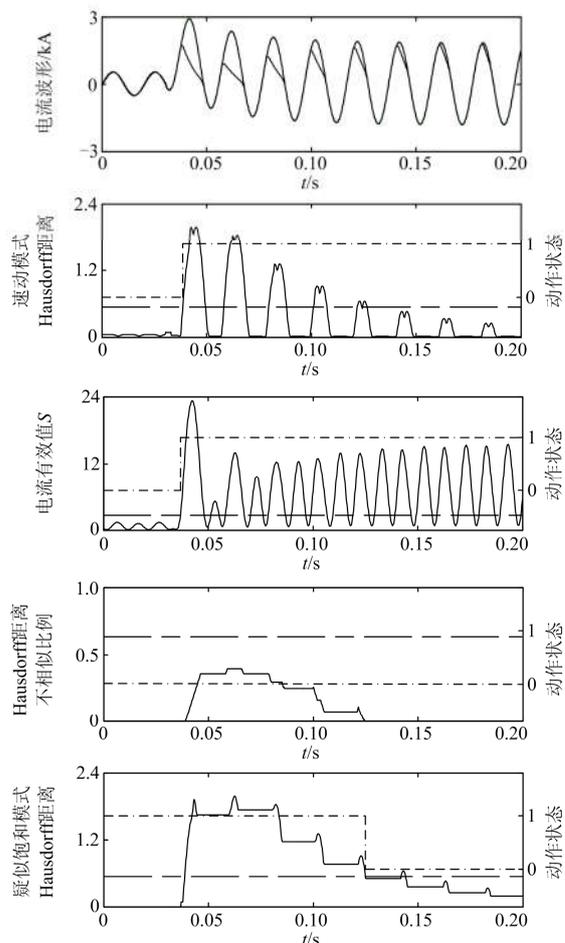


图 7 区外故障电流饱和和波形图及动作量示意图

Fig. 7 Current waveform and operating value under external fault with saturation

### 4.2.2 区外饱和转区内故障情况

在 4.2.1 节的基础上,  $t = 0.12$  s 时在 F1 点再次发生转换性区内两相接地短路故障。以 A 相为例进行分析, 其两侧电流及相似比例如图 8 所示。

进入疑似饱和模式方式与 4.2.1 节完全相同, 疑似饱和模式下, 数据窗长采用整周波, 因而对故障的响应速度慢于速动模式, 该模式下通过相似比例判断, 发生区内故障后 22 ms 相似比例越限, 保护出口。

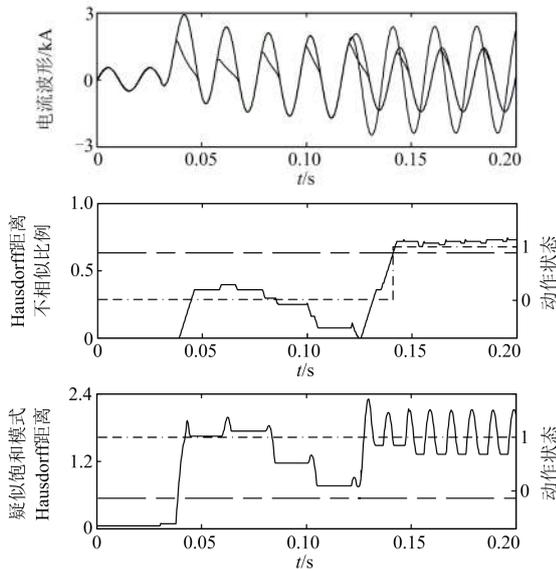


图 8 区外故障饱和和转区内故障电流波形图及动作量示意图  
 Fig. 8 Current waveform and operating value under the fault that changes from external one with saturation to internal one

### 5 结论

为满足发变组大差保护对动作速度和抗饱和特性的需求，提出了一种基于改进 Hausdorff 距离算法的发变组大差保护新算法，并进行了理论分析和仿真验证。该算法具有如下特点：

- 1) 所提算法时间窗可变，在八分之一时间窗内仍能保证算法的可靠性，具有较快动作速度，在 4 kHz 采样频率下可在故障后 1~2 ms 内动作；
- 2) 所提算法抗饱和能力强，可以实现区内故障互感器饱和和前快速动作，区外故障饱和的可靠识别并闭锁保护，饱和后发生转换性区内故障时又能可靠动作；
- 3) 所提判据以线路两端额定电流相位相差 90° 时的 Hausdorff 距离值乘以可靠系数作为整定门槛，整定过程简单方便且不受系统参数影响。

### 参考文献

[1] WU Q H, ZHANG J F, ZHANG D J. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.

[2] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 13-18.

LIN Xiangning, LIU Pei, GAO Yan. Ultra-high-speed line directional protection based on transient and mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 13-18.

[3] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 电力系统超高速保护的形态学-小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19-24.

LIN Xiangning, LIU Pei, LIU Shiming, et al. A novel integrated morphology-wavelet filter algorithm used for ultra-high-speed protection of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 19-24.

[4] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 121-125.

SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, et al. Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 121-125.

[5] 黄南天, 李富青, 王文婷, 等. 输电线路故障层次化变步长 Tsallis 小波奇异熵诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 38-44.

HUANG Nantian, LI Fuqing, WANG Wenting, et al. A method of transmission line faults diagnosis based on Tsallis wavelet singular entropy with hierarchical variable step size[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 38-44.

[6] 张保会, 郝治国. 智能电网继电保护研究的进展(一)——故障甄别新原理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 1-6.

ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Development of relay protection for smart grid (1): new principles of fault distinction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 30(1): 1-6.

[7] 陈德树, 马天皓, 刘沛, 等. 采样值电流差动微机保护的一些问题[J]. 电力自动化设备, 1996, 16(4): 3-8.

CHEN Deshu, MA Tianhao, LIU Pei, et al. Problems in realization of microcomputer based differential current protection by sampled values[J]. Electric Power Automation Equipment, 1996, 16(4): 3-8.

[8] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 47-54.

ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 47-54.

[9] 杨经超, 尹项根, 陈德树, 等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 71-77.

YANG Jingchao, YIN Xianggen, CHEN Deshu, et al. Study on the operating characteristic of sampled value differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,

- 23(9): 71-77.
- [10] 胡玉峰, 陈德树, 尹项根. 采样值差动及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 40-44.  
HU Yufeng, CHEN Deshu, YIN Xianggen. New differential protection of power apparatus based on sampled values and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 40-44.
- [11] 林湘宁, 何战虎, 刘世明, 等. 电流采样值差动保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 27-33.  
LIN Xiangning, HE Zhanhu, LIU Shiming, et al. Discussions on some aspects of sampling value differential current protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 27-33.
- [12] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 鉴别 TA 饱和的改进时差法研究[J]. 继电器, 2001, 29(11): 1-4.  
LI Yan, CHEN Deshu, ZHANG Zhe, et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA's saturation[J]. Relay, 2001, 29(11): 1-4.
- [13] 谷君, 郑涛, 肖仕武, 等. 基于时差法的 Y/ $\Delta$  接线变压器和应涌流鉴别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 6-11.  
GU Jun, ZHENG Tao, XIAO Shiwu, et al. A new algorithm based on time differential method to identify sympathetic inrush of transformers connected in wye-delta mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 6-11.
- [14] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 基于动态时间弯曲的差动保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 133-141.  
WANG Ye, LU Yuping, XU Yichao, et al. A differential protection algorithm based on dynamic time warping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 133-141.
- [15] WANG Anna, SUN Xiyan, ZHOU Xiaoxing, et al. Difference squared Hausdorff Distance based medical image registration[C] // Chinese Control and Decision Conference (CCDC), May 23-25, 2011, Mianyang, China: 4270-4272.
- [16] 练仕榴, 郑刚, 牟善玲. 用于心电波形分析的相似性度量策略[J]. 计算机工程, 2011, 37(9): 263-265.  
LIAN Shiliu, ZHENG Gang, MOU Shanling. Similarity measurement strategies for ECG waveform analysis[J]. Computer Engineering, 2011, 37(9): 263-265.
- [17] 翁汉琨, 刘华, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 1-9.  
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff Distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 1-9.
- [18] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027.  
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027.
- [19] 戚宣威, 李露, 黄晓明, 等. 区外故障导致变压器电流互感器饱和及差动保护误动问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 44-51.  
QI Xuanwei, LI Lu, HUANG Xiaoming, et al. Study on the CT saturation and mal-operation of the transformer current differential protection during external faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 44-51.
- [20] 杜皎, 陆于平, 朱国防. 幅值相位双判据变压器差动保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 79-85.  
DU Jiao, LU Yuping, ZHU Guofang. Differential protection algorithm with double criteria of amplitude and phase angle for transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 79-85.

收稿日期: 2018-07-09; 修回日期: 2018-08-24

作者简介:

王峰(1982—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电力系统继电保护相关研究和管理工作的; 15153768@qq.com

黄明辉(1965—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电力系统继电保护相关研究和管理工作的; E-mail: gdrelay@163.com

李一泉(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力系统继电保护相关研究和管理工作的。E-mail: topiceman1@sina.com

(编辑 许威)